

埋め込み境界法を用いた Lattice Kinetic スキームによる粒子系混相流解析 Lattice Kinetic Scheme for simulation of particulate flows with an immersed boundary

瀬田 剛, 富大, 富山市五福 3190, E-mail: seta@eng.u-toyama.ac.jp
Takeshi SETA, University of Toyama, 3190 Gofuku, Toyama-shi, Toyama

We verify the immersed boundary-lattice kinetic scheme (IB-LKS) by simulating different cases; a flow over a circular cylinder, a neutrally buoyant particle migration in a linear shear flow, and sedimentation of two circular particles in a viscous fluid. Comparison between the numerical results and those of previous studies demonstrates the validity of the IB-LKS for calculation of viscous incompressible flow with suspended solid particles. The IB-LKS is one solution approach for the problem of the velocity slip that is observed in the cylindrical Couette flow simulation with IB-LBM.

1. 緒言

埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method, IBM)⁽¹⁾を適用した Immersed Boundary-Lattice Boltzmann Method (IB-LBM)では、緩和時間が増加するにつれ、クエット流れの計算において境界近傍で流速分布の歪みが発生することが Le により報告されている⁽²⁾。稲室によって提案された Lattice Kinetic Scheme (LKS)^(3,4)は、LBM に対し緩和時間を $\tau=1$ とし、平衡分布関数を適切に設定することで導出される。IB-LKS は、IB-LBM のクエット流れの計算で流速の歪が生じない条件 $\tau < 2$ を満足でき、計算メモリを有効に活用でき、境界条件に流速勾配を考慮できる等の利点を有する。弾性係数等のパラメータ設定が不要である Direct forcing method を LKS に適用した IB-LKS の有効性を検証する。

2. 数値計算

Fig.1 に $Re = 20$ における円柱周り流れの計算における流れ関数を示す。円柱を埋め込み境界法で設定する。IB-LKS では、 $Re = 20$ に対し、抵抗係数 $C_D = 2.167$ 、渦長さ $L_W = 1.90$ 、 $Re = 40$ に対し、 $C_D = 1.607$ 、 $L_W = 4.80$ であった。Dennis による参照解⁽⁵⁾では $C_D = 2.045$ 、 $L_W = 1.88$ 、 $C_D = 1.522$ 、 $L_W = 4.69$ であり、妥当な結果が得られている。剪断流中に存在する移動粒子の挙動を解析する。幅 $W = 2000$ 、高さ $H = 80$ のチャンネル内に、直径 20、初速度 0 の粒子を高さ 20 の位置に設定する。上下壁は互いに逆方向に $u = 1/120$ の速さで移動する。 $Re = 40$ であり、重力は働かない。移動する粒子の高さの時間変化を Fig. 2 に示す。高い弾性係数を用いることで構造体から流体に作用する外力を計算する Penalty method に基づく IB-LBM⁽⁶⁾の結果を○で、FEM⁽⁷⁾の結果を●で、Direct forcing method に基づく IB-LKS と IB-LBM の結果を実線と破線で、それぞれ示す。Fig. 2 から IB-LKS による本計算結果が他の計算結果とよい一致を示しており、剪断流中の粒子挙動が IB-LKS によって適切に計算されることが分かる。重力加速度 $g = 980$ [cm/s²]を考慮し、チャンネル内の二粒子の沈降の計算を行う。チャンネル幅は 2 [cm]、高さは 8 [cm]、動粘性係数は 0.01 [cm²/s]、流体の密度は 1 [g/cm³]、粒子の密度は 1.01 [g/cm³]、半径は 0.1 [cm]とし、粒子 1 (Particle 1) は (0.999 [cm], 7.2 [cm]) に、粒子 2 (Particle 2) は (1 [cm], 6.8 [cm]) に配置する。時間刻みは 5.0×10^{-4} [s]である。粒子同士および粒子と壁との衝突には Glowinski によって提案された反発力を用いる⁽⁸⁾。Fig. 3 に $t = 0.5, 1.5, 2.5, 3.0, 4.5$ における流速分布と粒子位置とを、Fig. 4 に、水平方向 x と垂直方向 y の粒子位置の時間変化を示す。Fig. 4 から、IB-LKS による本計算結果が、Niu らの参照解⁽⁹⁾とよい一致を示していることが分かる。計算の初期において粒子間の距離が一定であったが、粒子 1 が粒子 2 に追いついた後、二つの粒子がチャンネル中心からゆっくり離れ、回転しながら離れていく DKT (Drafting, Kissing, Tumbling) 現象⁽⁹⁾を再現できていることが分かる。

3. 結言

IB-LKS を用い、円柱周り流れ、剪断流内の粒子挙動解析、2 粒子の沈降の計算を行った。参照解と良い一致が得られ、また、粒子の沈降の計算において DKT 現象が確認された。

参考文献

- (1) Peskin, C. S., J. Comput. Phys., 10, (1972), pp.252-271.
- (2) Le, G et al., Phys. Rev. E, 79, (2009), 026701.
- (3) Inamuro, T., Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 360, (2002), pp.477-484.
- (4) 吉野正人ほか機論 B, 73, (2007), pp.973-980.
- (5) Dennis, S. C. R., et al., J. Fluid Mech., 42 (1970) pp.471-489.
- (6) Feng, Z-G, et al., J. Comput. Phys., 195, (2004), pp.602-628.
- (7) Feng, J., et al., J. Fluid Mech., 277, (1994), pp.271-301.
- (8) R. Glowinski, et al., Int. J. Multiphase Flow, 25, (1999), pp.755-794.
- (9) Niu, X.D., et al., Phys. Lett. A, 354, (2006), pp.173-183.

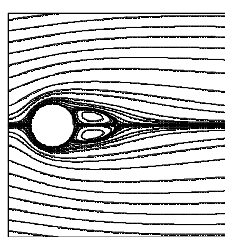


Fig. 1 flow past a cylinder

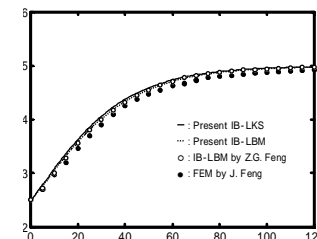


Fig. 2 The lateral migration of the particle.

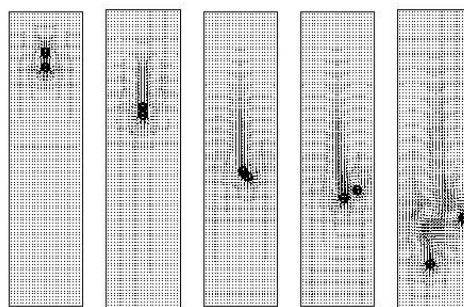


Fig. 3 Sedimentation of two particles in a channel.

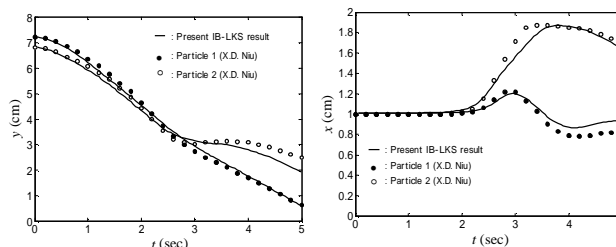


Fig. 4 Transverse and longitudinal coordinates of the two particles.